

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2010

PETR MOTYČKA

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

**SPECIÁLNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY
Z GEOPOLYMERŮ S VYUŽITÍM
ODPADOVÝCH ČEDIČOVÝCH VLÁKEN**

**SPECIAL COMPOSITE MATERIALS
FROM GEOPOLYMERS WITH USING
WASTE BASALT FIBERS**

Petr Motyčka

KTM - 572

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Kovačič

Rozsah práce:

Počet stran textu..... 55

Počet obrázků 21

Počet tabulek..... 13

Počet grafů 1

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr MOTYČKA**
Osobní číslo: **T09000031**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Textilní materiály a zkušebnictví**
Název tématu: **Speciální kompozitní materiály z geopolymerů s využitím
odpadových čedičových vláken**
Zadávající katedra: **Katedra textilních materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši na téma kompozitních materiálů založených na geopolymerech a čedičových vláknech
2. Navrhněte experiment konstrukce a využití kompozitních materiálů s geopolymerní maticí a čedičovými odpadovými vlákny
3. Experiment vyhodnoťte a proveďte diskusi výsledků

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 45

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:


1. Militký, J.: Textilní vlákna. Učební text TUL. Liberec 2005

Vedoucí bakalářské práce:


Ing. Vladimír Kovačič
Katedra textilních materiálů

Datum zadání bakalářské práce: 7. května 2010

Termín odevzdání bakalářské práce: 21. prosince 2010


prof. RNDr. Aleš Lipka, CSc.
děkan




prof. Ing. Jiří Militký, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 29. října 2010

P r o h l á š e n í

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 21. 12. 2010 v Liberci

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl srdečně poděkovat všem zúčastněným v průběhu realizace mé bakalářské práce.

Jmenovitě patří poděkování především panu Ing. Vladimíru Kovačičovi za vedení a pomoc. Děkuji i celé fakultě textilní a jejímu vedení za možnost studia a realizace této práce a firmě České lupkové závody, a.s. za poskytnuté informace.

Poděkování směřuji i celé mé rodině a přátelům za podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Předložená práce se zaměřuje na možné využití speciálních kompozitních materiálů z geopolymérů s využitím odpadových čedičových vláken. Práce si klade za cíl zjistit pevnost výsledných kompozitních materiálů při rozdílných hmotnostních poměrech. Kompozitní materiály byly konstruovány v těchto koncentracích čedičových vláken: 30, 40, 50, 60 %. Tyto konstrukce byly kromě toho vytvořeny jednak se surovým čedičovým odpadem, jednak byla u čedičových vláken zvýšena smáčivost přidáním povrchově aktivní látky (PAL) ve velmi malých koncentracích. Mechanické vlastnosti těchto kompozitů byly zkoumány metodou lámání vzorů 3-bodovým ohybem. V závěru práce jsou uvedeny výsledky těchto experimentů.

Klíčová slova

Geopolymer; čedičová vlákna; kompozity; anorganická pojiva; pevnost; čedičová vata

Abstract

The following thesis is focused on the possible use of special composite materials from geopolymers with using waste basalt fibers. This study aims to determine the strength of the resulting composites with different weight ratios. Composite materials have been constructed in the following concentrations of basalt fibers: 30, 40, 50, 60%. These structures were first created in addition to raw basalt waste, both in the basalt fibers increased wettability by adding surfactant (PAL) in very small concentrations. The mechanical properties of these composites were investigated by breaking the patterns of 3-point bending. In the end there are the results of these experiments.

Keywords

Geopolymer; basalt fibers; composites; inorganic binders; strength; basalt wool

Obsah

Seznam použitých obrázků	7
Seznam použitých tabulek	8
Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Úvod.....	11
1. Historie.....	12
1.1. Anorganická pojiva	12
1.2. Čedičová vlákna	13
2. Teoretická část	15
2.1. Anorganická pojiva	15
2.1.1. Chemická pojiva	15
2.1.2. Speciální příměsi.....	16
2.1.3. Alkalicky aktivovaná pojiva	16
2.1.3.1. Mechanismus alkalické aktivace	17
2.1.3.2. Význam alkalické aktivace v průmyslu	17
2.1.3.3. Metakaolinit	18
2.1.3.4. Lupek	18
2.1.3.5. Vodní sklo.....	18
2.1.4. Geopolymery.....	19
2.1.4.1. Definice geopolymery	19
2.1.4.2. Struktura geopolymery	19
2.1.4.3. Příprava geopolymery.....	20
2.2. Čedičová vlákna	20
2.2.1. Definice čediče.....	20
2.2.2. Složení čediče	22
2.2.3. Technologie výroby čedičových vláken	23
2.2.4. Výroba čedičových vláken.....	25
2.2.4.1. Pneumatický způsob	26
2.2.4.2. Odstředivý způsob za použití rozvlákňovacího kotouče	26
2.2.4.3. Kombinované výrobní způsoby	27
2.2.5. Vlastnosti čedičových vláken	27
2.2.5.1. Mechanické vlastnosti	27

2.2.5.2. Chemické vlastnosti.....	28
2.2.5.3. Tepelná odolnost a tepelně izolační vlastnosti	28
2.2.6. Čedičová vlákna a životní prostředí.....	29
2.2.7. Použití čedičových vláken	29
2.2.8. Výroba čedičové vaty	30
2.3. Kompozitní materiály	32
2.3.1. Definice kompozitních materiálů.....	32
2.3.2. Synergický efekt	33
2.3.3. Rozdělení kompozitů	34
2.3.3.1. Textilní vlákna pro kompozity.....	35
2.3.4. Vlastnosti vláknových kompozitů.....	35
2.3.5. Použití kompozitů	37
3. Experimentální část.....	38
3.1. Návrh experimentu.....	38
3.2. Baucis L160	38
3.3. Technologický postup	39
3.3.1. Všeobecné pokyny	39
3.3.2. Pokyny pro použití pojiva Baucis na jednotlivé aplikace:	39
3.4. Poměry jednotlivých směsí	41
3.5. Postup přípravy vzorků	42
3.6. Zkoušení vzorků.....	44
3.7. Obrázky lomu vzorků.....	47
3.8. Vyhodnocení zkoušky	48
4. Závěry a doporučení.....	52
5. Seznam použité literatury.....	53

Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Ukázka lomu čedičového vlákna. Zdroj [32]	21
Obr. 2 Vzhled nejčastějších složek čedičové horniny [08].....	22
Obr. 3 Molekulární znázornění povrchu čediče dle [11].	23
Obr. 4 Odstředivý způsob výroby čedičového vlákna. Převzato z literatury [26].....	31

Obr. 5 Znázornění procesu výroby čedičové izolace. Převzato z literatury [26].....	31
Obr. 6 Desky z čedičové vaty. Zdroj [36].....	32
Obr. 7 Znázornění synergického efektu dle literatury [25]	33
Obr. 8 Druhy vláknových kompozitů – částicový, s krátkými a dlouhými vlákny dle literatury [25]	35
Obr. 9 Baucis L160 v sypké formě	41
Obr. 10 Odpadová čedičová vata	42
Obr. 11 Laboratorní váha OHAUS® E4000D.....	43
Obr. 12 Hmoždíř použitý k drcení odpadové čedičové vaty	43
Obr. 13 Kovová lišta použitá jako forma.....	44
Obr. 14 Vzorčky směsí	44
Obr. 15 Zkušební přístroj TIRA test 2003	46
Obr. 16 Čelisti zkušebního přístroje TIRA test 2003	46
Obr. 17 Vzorček s 30% čedičových vláken.....	47
Obr. 18 Vzorček s 40% čedičových vláken.....	47
Obr. 19 Vzorček s 50% čedičových vláken.....	48
Obr. 20 Vzorček s 60% čedičových vláken.....	48
Obr. 21 Graf pevnosti směsi v závislosti na procentuální hmotnosti čedičových vláken	51

Seznam použitých tabulek

Tab. 1 Rozdělení technologií výroby čedičových vláken. Převzato z [14]	26
Tab. 2 Technické údaje pojiva Baucis L160.....	38
Tab. 3 Hmotnost jednotlivých složek	41
Tab. 4 Měrná hmotnost zkoušených vzorků.....	45
Tab. 5 Výsledek zkoušky směsi s 30 % čedičových vláken.....	49
Tab. 6 Výsledek zkoušky směsi s 40 % čedičových vláken.....	49
Tab. 7 Výsledek zkoušky směsi s 50 % čedičových vláken.....	49
Tab. 8 Výsledek zkoušky směsi s 60 % čedičových vláken.....	49
Tab. 9 Výsledek zkoušky směsi s 30 % čedičových vláken a přídavkem PAL	50
Tab. 10 Výsledek zkoušky směsi s 40 % čedičových vláken a přídavkem PAL	50

Tab. 11 Výsledek zkoušky směsi s 50 % čedičových vláken a přídavkem PAL	50
Tab. 12 Výsledek zkoušky směsi s 60 % čedičových vláken a přídavkem PAL	50
Tab. 13 Porovnání průměrných hodnot měření	50

Seznam použitých zkratk a symbolů

$2(\text{MgFe}) - \text{O} - \text{SiO}_2$	olivín
Al	hliník
Al_2O_3	oxid hlinitý
AlO_4	tetraedr
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	anortit
CaCO_3	uhličitan vápenatý
CaO	oxid vápenatý
CO_2	oxid uhličitý
Fe_2O_3	oxid železitý
Fe_2SiO_4	fayalit
FeO	oxid železnatý
H	vodík
K_2O	oxid draselný
Mg_2SiO_4	forsterit
MgO	oxid hořečnatý
MnO	oxid manganistý
Na_2O	oxid sodný
$\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$	nefertin
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	albit
NaOH	hydroxid sodný
O	kyslík
P_2O_5	oxid fosforečný
Si	křemík
SiO_2	oxid křemičitý
SiO_4	tetraedr
T_c	teplota krystalizace

TiO_2	oxid titaničitý
UV záření	ultrafialové záření
A_{\max}	maximální průhyb [mm] a [%]
b	šířka příčného řezu tělesa [mm]
E	modul pružnosti [MPa]
F_{\max}	maximální dosažená síla v ohybu [N]
h	výška příčného řezu tělesa [mm]
L	vzdálenost mezi podpěrami zkušebního stroje [mm]
p	atmosférický tlak [kPa]
T	teplota [°C]
σ_w	pevnost v ohybu [MPa]
φ	relativní vlhkost vzduchu [%]

Úvod

Cílem bakalářské práce je rozpracovat možné využití speciálních kompozitních materiálů z geopolymérů s využitím odpadových čedičových vláken. S problémem odpadových čedičových vláken se setkávají zejména výrobci izolačních rohoží, v současné době jsou tato vlákna vyvážena na skládku. Práce si dále klade za cíl zjistit mechanické vlastnosti výsledných kompozitních materiálů při rozdílných hmotnostních poměrech těchto čedičových vláken pro použití ve stavebnictví. Předpokladem je, aby geopolymérace byla ekonomicky výhodnější nebo alespoň srovnatelná s alternativní likvidací odpadových čedičových vláken a současně by měla být co nejekologičtější. Například u výroby cementu vzniká velké množství skleníkových plynů (oxidu uhličitého) a případné zalití odpadových čedičových vláken do skla (vitifikace) je příliš nákladné [22].

Kompozitní materiály byly konstruovány tak, že do Baucisu (geopolymeru) byla zapracována odpadová čedičová vlákna v poměrech 30, 40, 50, 60%, u další šarže vzorků byl použit PAL v minimálním poměru, tzn. 3 kapky na 1 litr.

1. Historie

1.1. Anorganická pojiva

Mezi anorganická pojiva patří především hydraulické vápno a cement. Dále můžeme jmenovat sádku, síranová pojiva, hořečnatá pojiva nebo například vzdušné vápno.

Podle údajů v literatuře [15] se používání cementu podstatným způsobem rozšířilo v posledních dvou stoletích, přestože proces hydraulického tuhnutí a tvrdnutí byl znám již ve starověku. První údaje o něm lze nalézt z období okolo poloviny prvního tisíciletí př. n. l. z Řecka, Fénicie a Říma. Vlastní název cement pochází z latinského slova „caedere“, tj. tlouci. Starší Římané používali tento výraz i pro označení lomového kamene. Zdivo vystavěné za pomoci tohoto materiálu pak označovali jako „caementa“, resp. „structurae caementicae“. Současný pojem „**cement**“ vznikl náhodou v roce 1774, kdy překládal Francouz Lorient dílo Naturalis historia od Gaia Plinia Secunda a pro slovo „caementa“ použil výraz „ciment“. Odtud byl výraz převzat do odborné literatury jako označení pro maltoviny schopné tvrdnutí pod vodou v pevnou hmotu.

Ve starém Římě se pro přípravu hydraulických maltovin používalo dobře vyhašeného vápna a sopečných popelů, tzv. tufů. Rovněž znali technologii ukládání směsi do bednění, kde drobné kusy kameniva zalévali pojivovou směsí vápna a sopečného popela.

V souvislosti s rozvojem výzkumů v chemii a stavebnictví v průběhu 18. století se postupně dospělo k názoru, že hydraulické vlastnosti nemá vápno vyrobené z čistých vápenců, ale z vápenců znečištěných jíly. Roku 1796 si v Anglii James Parker patentoval výrobu cementu z „kentského“ vápence pod názvem románský cement, který vykazoval vhodný obsah jílovitých složek.

Na začátku 19. století byla L. J. Vicatem vyrobena a v praxi použita maltovina, připravená ze směsi vápence a jílu. Tím bylo potvrzeno, že jílovitou složku je možno do vápence dodat „uměle“. Je to nutné v případech, kdy není obsažena přirozeně. Patent na výrobu **portlandského cementu** byl přiznán roku 1824 zedníkovi z Leedsu, Johnu Aspdinovi. Název portlandský dostal protože, z něj vyrobený beton se podobal oblíbenému šedobílému vápenci z anglického ostrova Portlandu. Roku 1844

I. Ch. Johnson upozornil na důležitost přesného dodržování a stálého sledování správného mísícího poměru surovin. Hlavní důraz kladl na ostré pálení, aby nastalo slinutí. Tím vznikl portlandský cement, jenž je známý v současné době [15].

V rámci výzkumu bylo zjištěno, že při výrobě portlandského cementu se uvolňuje velké množství skleníkových plynů. To vede ke snaze nalézt uplatnění pro geopolymerní materiály, u kterých je menší množství těchto plynů.

Reakce, které vedou ke vzniku alkalicky aktivovaných materiálů, nalezneme již od roku 1959. Termín **geopolymer** byl navržen profesorem Davidovitem na konci sedmdesátých let a od této doby je datován i jejich výzkum. [12]

1.2. Čedičová vlákna

První zmínku o tavení hornin můžeme nalézt již z roku 1777 od V. Neveuxe (1925), kdy se D'Arcet pokoušel tavit čedič v peci určené pro vypalování porcelánu a tím získal černé sklo. Tavením čediče se zabývaly i další vědci jako Skotové J. Hall (1801). G. Watt, G. Bischof. Ti se pokoušeli více či méně úspěšně nalézt způsob tavení a posléze chlazení hmoty. G. Bischof (1837) vyrobil taveninu, která svým mikroskopickým vzhledem odpovídá nynějšímu průmyslově tavenému čediči [14].

Avšak tyto badatelé se zajímali pouze o vědecké poznání čedičové taveniny. Francouzský lékař Francois Ribbé se na rozdíl od nich pokusil o tavení čediče takovým způsobem, aby se dalo využít jeho mechanické odolnosti. Jeho práce se zabírala technologií chlazení a krystalizace čediče. Výsledky si patentoval v letech 1909 – 1913 a na základě tohoto patentu lze říci, že začíná nová éra v tavení hornin ve Francii a posléze i v Německu a Rusku [14].

Za první světové války nastal průmyslový rozmach výroby horninových vláken. Byla to snaha nahradit přírodní dlouhovláknitý azbest za čedič, který má velmi podobné vlastnosti.

Jako první si nechala patentovat způsob výroby čedičových vláken francouzská společnost Générale v roce 1920. Za druhé světové války a hlavně po ní vzrostla výroba horninových vláken v průmyslově vyspělých státech. Také náš průmysl se v této době začal zajímat o tuto problematiku. Hlavním cílem bylo získání materiálu, který by měl odolnost vůči velmi vysokým i nízkým teplotám, měl by výbornou chemickou odolnost a eventuálně odolnost vůči korozi. Přitom by jeho získání a výroba byla za velmi

nízkých nákladů, pro doly, hutě i elektrárny. U nás začala výroba čedičových vláken v roce 1952 v Duchcovských sklárnách. V posledních letech se snažíme využít dobrých vlastností čediče a nahradit škodlivý (karcinogenní) azbest [14].

2. Teoretická část

2.1. Anorganická pojiva

Podle údajů v literatuře [15] se termínem pojiva označují látky, které můžeme upravit do tekuté nebo kašovitě formy a které následně z této formy relativně snadno přecházejí do formy pevné. Díky tomuto procesu mají pojiva schopnost spojit nesoudržná zrna nebo kusy různých látek v soudržnou, kompaktní hmotu. Proces zpevňování můžeme rozdělit na dvě na sebe navazující fáze, těmi jsou tuhnutí a tvrdnutí. Ve fázi tuhnutí ztrácí tekutá nebo kašovitá hmota svoji původní zpracovatelnost a postupně se její charakter mění na pevnou látku. Následně, během fáze tvrdnutí, vzniklá pevná látka a postupně získává vyšší pevnost. Ta je potřebná při praktickém použití pojiva v konkrétní stavební aplikaci.

Ve stavebnictví převažují pojiva založená na anorganické bázi. Anorganická pojiva lze rozdělit na:

- **pojiva mechanická**, u kterých během procesů tuhnutí a tvrdnutí nedochází ke změně chemické podstaty látky (těmi jsou například jíly a hlíny),
- **pojiva chemická**, u kterých se během procesů tuhnutí a tvrdnutí odehrávají chemické reakce a dochází ke vzniku nových minerálních fází, respektive nových chemických sloučenin.

2.1.1. Chemická pojiva

Jsou pojiva založená na anorganické bázi. Podle prostředí, v němž dochází k tuhnutí a tvrdnutí, a podle jejich stálosti ve vodném prostředí lze tato pojiva rozdělit na [15]:

- **pojiva vzdušná**, k jejichž vytvrzení dochází pouze na vzduchu, ale ani po dokonalém vytvrzení nejsou zcela odolná vůči vodě (sádra a síranová pojiva, hořečnaté pojivo, vzdušné vápno),
- **pojiva hydraulická** jsou pojiva, která po smíchání s vodou, a většinou po počátečním zatuhnutí na vzduchu, mají schopnost dále tuhnout a tvrdnout na vzduchu nebo i pod vodou (hydraulické vápno, cementy).

2.1.2. Speciální příměsi

Při výrobě hydraulických pojiv se také často uplatňují speciální příměsi, které upravují požadované vlastnosti maltovin. Jsou to zejména [15]:

- **latentně hydraulické látky** patří mezi anorganické látky, které samy při rozdělání s vodou netuhnou ani netvrdnou, ale po přidání určitého množství „budiče“ (aktivátoru, např. CaO) vykazují s vodou hydraulické vlastnosti (typickou přísadou tohoto typu je vysokopecní granulovaná struska),
- **pucolány** jsou křemičité nebo hlinito-křemičité anorganické látky, které nemají žádné nebo jen velmi slabé pojivové vlastnosti. Ale v přítomnosti hydroxidu vápenatého vytvářejí hydratační produkty, které jsou podobné produktům hydratace portlandského cementu. Může se jednat buď o přírodní pucolány (pemzu, tufy, tras a křemelinu) nebo o pucolány umělého původu (suché elektrářenské popílký, kalcinované břidlice a metakaolín).

2.1.3. Alkalicky aktivovaná pojiva

Tato pojiva tvoří podskupinu anorganických pojiv. Úpravu těchto látek z kašovité formy do formy pevné docílíme přidáním alkalického roztoku, zpravidla na bázi sodíku nebo draslíku. Pozitivním přínosem je urychlení jejich hydratace a tím urychlení i času tuhnutí a tvrdnutí. Negativní vlastnost můžeme spatřovat ve vytváření nežádoucích fází [15].

Podle působení alkalických látek na látky složené ze základních prvků (křemíku a hliníku) lze členit typy materiálů na čtyři základní, těmi jsou:

- bezsádrovcový portlandský cement,
- strusko-alkalická pojiva,
- pojiva "Chemically Activated Fly Ash",
- geopolymery.

2.1.3.1. Mechanismus alkalické aktivace

První zmínku o alkalické aktivaci kaolinitických látek, popílků a strusek popisuje profesor V. D. Gluchovskij roku 1959. Výsledky svého výzkumu shrnuje v publikaci Gruntosilikaty z roku 1959 vydané v Kyjevě. V České republice se výzkumem alkalické aktivace zabývá od roku 1973 Ústav skla a keramiky VŠCHT v Praze.

Podle údajů v literatuře [12] princip alkalické aktivace závisí na typu materiálu, od kterého očekáváme proceduru alkalické aktivace. Není vždy stejný, ale platí princip, že molekuly původního materiálu jsou ve výsledku spojeny v makromolekuly. Tyto makromolekuly známe převážně z organických řetězců.

Pro vytvoření materiálů, které můžeme nazývat geopolymery, je podle údajů v literatuře [17] a [18] nejprve potřeba uvolnit stávající vazby (odbourat hlinito-křemičitan). To se děje v silně zásaditém prostředí. Atomy hliníku pronikají do struktury Si-O-Si a vznikají aluminosilikátové gely, takzvané geopolymerní prekurzory. Toto platí v ideálním případě při příhodném poměru koncentrace pevné látky a alkalického aktivátoru. Alkalický aktivátor reaguje s Si-Al prekurzory, tím vznikne produkt geopolymer [12].

Přesnější vyjádření je složitější. Proces alkalické aktivace nebyl dosud zcela popsán.

2.1.3.2. Význam alkalické aktivace v průmyslu

Podle údajů v literatuře [22] jsou alkalicky aktivované materiály brány jako alternativa k materiálům připraveným z Portlandského cementu. Při výrobě Portlandského cementu je spotřebováno velké množství energie a uvolní se více oxidu uhličitého, tím dnes vyvstává zásadní problém pro ekologii. U alkalické aktivace je hlavním problémem cena, především cena aktivátoru.

Vznik CO_2 při výrobě portlandského cementu je dán rozkladem CaCO_3 . Na 1 tunu portlandského cementu vzniká přibližně 1 tuna CO_2 . U geopolymerního pojiva je to 0,184 tuny CO_2 , což je pětikrát až šestkrát méně než u portlandského cementu [12].

Při rozhodování, jakou technologii použít, musíme vycházet z vlastností materiálu, které technologie poskytne. Vlastnosti a význam materiálů z cementu, oproti alkalicky aktivovaným materiálům, jsou známy o mnoho déle. Na toto téma bylo provedeno několik výzkumů a jejich popis nalezneme v příslušné literatuře. Hlavní soupis je například v práci [19].

2.1.3.3. Metakaolinit

Metakaolin je produkt typu pucolánu vyrobený výpalem kaolinů, kaolinitických jílů a jiných vhodných surovin v teplotním rozmezí cca 600–900 °C. Pucolány jsou křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, které získávají pojivé vlastnosti reakcí s Ca(OH)_2 za přítomnosti vlhkosti. [28]

Francouzský profesor Joseph Davidovits považuje metakaolinit za velice perspektivní materiál pro jeho alkalickou aktivaci. Z hlediska vlastností, dostupnosti zpracování, ale i z hlediska cenové dostupnosti.

2.1.3.4. Lupek

Lupek je usazenou horninou, jeho podstatnou část tvoří kaolinit. Jedná se o horninu, která je pevná a za sucha se rozpadá. Je podobně jako kaolin využíván v keramickém průmyslu pro své vlastnosti. Liší se od sebe tím, že kaolin se vyskytuje ve své práškové podobě, kdežto lupek je nutno drtit [20].

Naleziště lupku v Čechách jsou v Kladensko-rakovnické pánvi. Těží se u Nového Strašecí (České lupkové závody, a. s.) [20].

2.1.3.5. Vodní sklo

Podle údajů v literatuře [23] je sodnokřemičité sklo tavené z písku a sody v kontinuální vanové peci při teplotách 1300 - 1400°C. Dochází ke granulování plynule vytékající skloviny a následnému ochlazení vodou. Pro převedení do roztoku se sklo drtí na velikost částic 0,5 mm. K jeho rozpouštění dochází v autoklávu při zvýšené

teplotě a tlaku, a to z důvodu příliš nízké rozpustnosti ve vodě za normálního tlaku. Po rozpuštění se přidává NaOH pro zvýšení viskozity vzniklé kapaliny a zároveň dojde k upravení silikátového modulu vodního skla.

Silikátový modul M_s je molárním poměrem zastoupení SiO_2 a Na_2O v aktivátoru. Vodní sklo je jím charakterizováno a jedná se tak o jeden z údajů udávaných výrobcí [03].

2.1.4. Geopolymery

2.1.4.1. Definice geopolymery

Geopolymer nelze chápat pouze jako samostatný produkt, je výsledkem určité technologie. Za geopolymery označujeme anorganické polymerní materiály připravované polykondenzační reakcí základních hlinito-křemičitanových oxidů (Si_2O_5 , Al_2O_3) v zásaditém prostředí. Zde dojde ke vzniku kovalentních vazeb Si-O-Al. Reakce probíhají za normální teploty a tlaku. Taková reakce byla označena jako geopolymrace [23].

Podle údajů v literatuře [12] chápeme názvosloví geopolymer jako produkt, který byl vytvořen z čistého metakaolinu. Jednotlivé zdroje se ale na obecném termínu neshodnou. Geopolymer je pouze jedním z typů alkalicky aktivovaných materiálů.

2.1.4.2. Struktura geopolymery

Je vhodné uvést termín polysialát. Jedná se o označení geopolymery, který je založený na hlinito-křemičitanové struktuře. Sialát je zkratka pro značení "silicon-oxo-aluminate". Jeho struktura se skládá z řetězců tetraedrů SiO_4 a AlO_4 .

Pro výslednou strukturu polymeru je rozhodující poměr mezi Si a Al [24]. Pro vytvoření prostorové sítě musí být maximální poměr Si : Al = 2 : 1, naopak pro získání dvourozměrného charakteru polymeru je zapotřebí poměr Si : Al = 3:1.

2.1.4.3. Příprava geopolymérů

Pro výrobu je potřeba vhodná látka, schopná přeměnit svou strukturu, a příslušná reakce. Pro geopolymeraci je nejvhodnější kaolinit. Kaolinit (v praxi častěji užívané kaolin) je polymer (poly-siloxový řetězec), při jehož zahřátí na 750 °C vzniká metakaolinit. Výsledný metakaolinit je označován MK-750 (podle teploty výroby). Dále následuje polykondenzační reakce v zásaditém prostředí a poté je potřeba provést geopolymerizaci [12].

2.2. Čedičová vlákna

2.2.1. Definice čediče

Mezi nejběžnější horniny na povrchu Země patří čedičové horniny. Ty se nacházejí v několika geotektonických prostředích, např. na středooceánských hřbetech, ostrovních obloucích, ale i v driftových zónách. Čediče jsou převážně výsledkem tavení svrchního pláště Země (v hloubkách 40 – 200 km) [02], [03].

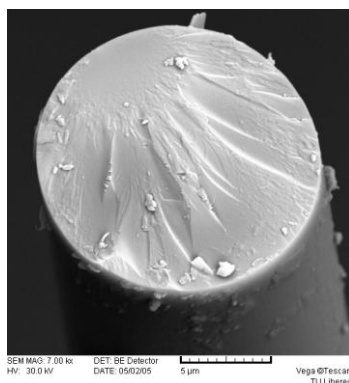
Čedič je vlastně ztuhlá láva některých sopek. Jde o generický název pro skupinu hornin obsahujících řadu kysličníků. Čedičové horniny tají přibližně v rozmezí teplot 1500 - 1700 °C. Při dostatečně rychlém chlazení vzniká sklovitá, přibližně amorfní struktura. Pomalé chlazení vede ke vzniku krystalické struktury směsi minerálů. Základní jsou plagiocen (teplota krystalizace $T_C = 1010$ °C) a pyroxen (teplota krystalizace $T_C = 830$ °C), které tvoří kolem 80 % čedičů. Z jednotlivých složek čediče dominuje kysličník křemičitý SiO_2 (optimální rozmezí 43,3-47 %), následuje Al_2O_3 (optimální rozmezí 11 - 13 %), CaO (optimální rozmezí 10-12 %) a MgO (optimální rozmezí 8-11 %). Ostatní kysličníky jsou obsaženy v koncentracích pod 5 %. Čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken, obsahují obvykle dva základní minerály tj. olivín ($2(\text{MgFe}) - \text{O} - \text{SiO}_2$) a nefelin ($\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$). Podle obsahu SiO_2 se čediče klasifikují do tří skupin:

1. alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42 %,
2. slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 od 43 do 46 %,
3. kyselé čediče s obsahem SiO_2 nad 46 % (využívané pro výrobu vláken).

Čedič je stabilnější v silně alkalickém prostředí než skla. Na druhou stranu je stabilita v kyselém prostředí nižší. Čedičové produkty se mohou použít od velmi nízkých teplot (kolem $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) až do poměrně vysokých teplot $700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při vyšších teplotách (nad $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) dochází ke vzniku krystalické struktury, která je důvodem snížení pevnosti. Teplota zesklnění z termomechanických křivek je $T_g = 596\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tepelná roztažnost pod T_g je $a_1 = 4,9 \cdot 10^{-6}\text{ deg}^{-1}$ a nad touto teplotou je $a_2 = 19,1 \cdot 10^{-6}\text{ deg}^{-1}$.

Čedičová vlákna se vyrábějí tavným zvlákňováním při $1500\text{--}1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlákná mohou být dále dloužena při teplotách kolem $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měrná hmotnost je 2733 kgm^{-3} a teplota měknutí se pohybuje kolem $960\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměr vláken se pohybuje kolem $9\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$.

Pevnost čedičových vláken se pohybuje kolem $1,1\text{--}1,5\text{ GPa}$., smykový modul kolem $21,76\text{ GPa}$, a tažnost kolem 2% . Modul pružnosti v axiálním stlačení je 112 GPa . S výhodou lze použít pro vybrané aplikace čedičová vlákna potažená např. polyestery [65]. ‘ [01, str. 218 - 219] Na obrázku 1 můžeme vidět lom čedičového vlákna.



Obr. 1 Ukázka lomu čedičového vlákna. Zdroj [32]

Z čediče, podobně jako ze skla, lze vyrobit vlákna. K přednostem čedičových vláken patří dobrá dostupnost a nenákladnost surovin, výborné tepelně-izolační vlastnosti s použitím v širokém teplotním rozsahu.

Čedičová vlákna mohou být vyrobena ve formě stříže nebo nekonečného hedvábí. Nezanedbatelná je pevnost a tažnost vlákna. V textilním průmyslu jsou vlákna využívána pro svou nehořlavost, chemickou odolnost a odolnost proti vlhkosti. Kompozitní materiály z čedičových vláken mají využití například v automobilovém průmyslu nebo izolační technice jako zvuková či tepelná izolace [06].

2.2.2. Složení čediče

Podle údajů v literatuře [08] a [09] jsou čediče tvořeny vyrostlicemi, mezi které patří např.:

- pyroxeny (50 hm %),
- magnetit (10 hm %),
- olivín (15 – 20 hm %),
- plagioklas (30 hm %).

Pyroxeny patří do velké skupiny horninotvorných nerostů. Typická je pro ně pravoúhlá štěpnost a dobrá tavitelnost. Jedním z hlavních představitelů pyroxenů je augit. Obsahuje kysličníky kovů a SiO_2 .

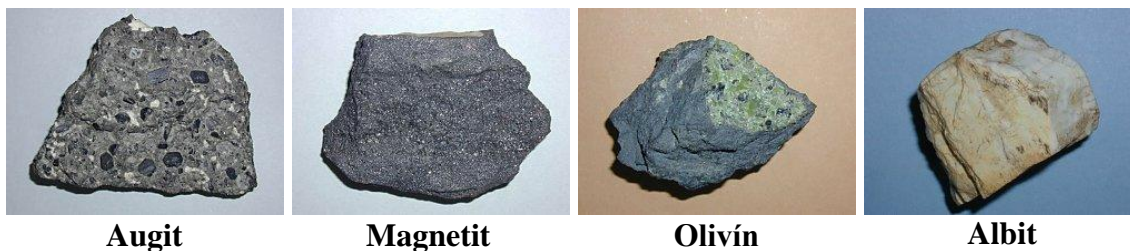
Augit má černohnědou až černou barvu, jeho tvar tvoří krátké sloupcovité krystaly s osmiúhelníkovým průřezem.

Magnetit se řadí mezi těžce tavitelné nerosty. Má zrnitou strukturu s černým lesklým vzhledem. Jedná se o směs FeO a Fe_2O_3 .

Olivín je žlutozelený až olivově zelený nerost se skelným leskem a krystalovým povrchem. Je to křemičitan, který má proměnlivý podíl hořčíku a železa. Stejně jako magnetit je olivín těžce tavitelný nerost. Složení Mg_2SiO_4 a Fe_2SiO_4

Plagioklasy neboli sodnovápenaté živce jsou směsí albitové a anortitové složky. Tvoří v hornině větší krystaly, které jsou známé svými vícenásobnými změnami ve složení od středu k okraji. Složení: albit - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; anortit - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

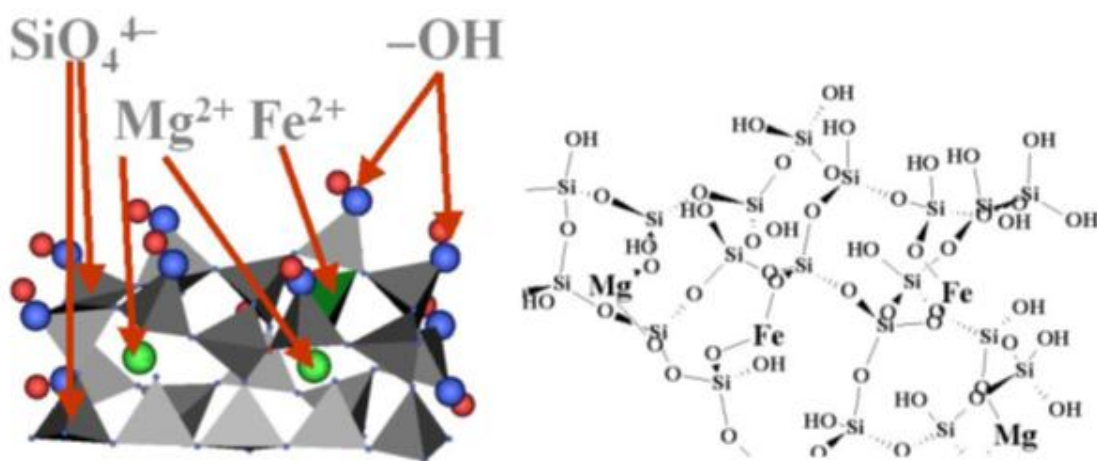
Obrázek 2 představuje ukázkou podoby nejčastějších složek čedičové horniny a na obrázku 3 je molekulární znázornění povrchu čediče.



Obr. 2 Vzhled nejčastějších složek čedičové horniny [08].

Chemické složení Českého čediče podle procentuálního vyjádření hmotnosti:

- SiO_2 (silica) 42 – 52,5 %
- Al_2O_3 (alumina) 15 – 19,5 %
- FeO 6,5 – 11,5 %
- CaO 6 – 11,3 %
- Na_2O 3,8 – 20,3 %
- MgO 2,6 – 5,2 %
- K_2O 2 – 4 %
- TiO_2 1,5 – 3,5 %
- P_2O_5 0,4 – 0,8 %
- MnO 0,25 – 0,35 %



Obr. 3 Molekulární znázornění povrchu čediče dle [11].

2.2.3. Technologie výroby čedičových vláken

Důležité vlastnosti čedičové horniny pro výrobu vláken [14]:

- konstantní složení výchozí horniny a poměry jednotlivých složek se nesmí příliš lišit,
- snadná tavitelnost výchozí horniny bez zbytků původní krystalické fáze,
- dostatečný obsah kyselých kyslíčků, především SiO_2 a Al_2O_3 ,

- vhodné mineralogické složení výchozí horniny zaručující snadné a kompletní tavení,
- chemická homogenita roztaveného materiálu (čerstvé horniny beze stop zvětrávání).

Čedičové horniny se pro účely tavení dělí podle chemického složení do tří skupin:

- alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42 %,
- slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 od 43 % do 46 %,
- kyselé čediče s obsahem SiO_2 nad 46 %.

Surovinou pro výrobu čedičových vláken jsou přírodní čediče. K výrobě vláken se obvykle používá kyselé čedič (s obsahem SiO_2 cca 46 – 51 hmotnostního %). Ten se následně drtí na kamenivo o velikosti 0,6 – 0,8 cm pro mikrovlnnou pec a 8 – 10 cm pro klasickou pec [14].

Čedičová vlákna se vyrábějí tavným zvlákňováním při teplotách 1500 – 1700 °C. a dále mohou být dloužena při teplotách kolem 1300 °C. Průměr zhotovených vláken se pohybuje kolem 9 až 12 μm . Čedičová vlákna lze použít až do přibližné teploty 700 °C, ale při vyšších teplotách (nad 300 °C) dochází ke vzniku krystalické struktury a tím ke snížení pevnosti vláken [01].

Mezi klasické způsoby výroby čedičových vláken patří například metoda výroby vláken odstředivým způsobem a metoda výroby vláken rozfukováním.

Podle údajů v literatuře [14] hraje také důležitou roli v kvalitě vyrobených čedičových vláken úroveň technologického zařízení stejně, jako celý technologický proces výroby. Během procesu je důležité sledovat fyzikálně-chemické vlastnosti roztavené horniny.

Mezi tyto vlastnosti patří:

- viskozita,
- teplota liquidu,
- schopnost krystalizace.

Viskozita je funkcí chemického složení a teploty. Je závislá na teplotě a exponenciálně klesá. Je to důležitá vlastnost při chladnutí taveniny pro následující děje roztavené horniny. Souvisí s vývojem určité krystalické fáze, což je nežádoucí jev. Má vliv na proces tvarování vlákna. S rostoucí viskozitou postupně klesá schopnost krystalizace taveniny.

Teplota liquidu je teplota, pod kterou nedochází ke spontánní krystalizaci v silotvorných soustavách jako například u látek krystalických. Čedičové taveniny mají vysokou teplotu liquidu (přibližně 1200 °C). Teplota solidu se pohybuje okolo 1000 °C. Tyto teploty liquidu a solidu jsou vyšší než u jiných obyčejných vyvřelin. Z technologického hlediska je vhodné udržovat interval mezi pracovní teplotou a teplotou liquidu v rozmezí 50 – 100 °C, někdy i vyšší.

Schopnost krystalizace. Stupeň a průběh krystalizace silně ovlivňují vlastnosti získané hmoty, především způsob ochlazování. Často se stává, že za stejných teplot probíhá tvorba vláken různě. Každé porušení technologického postupu výroby se projeví ve způsobu ochlazování i ve vlastnostech čedičových vláken.

U čedičových vláken jde v procesu výroby o tzv. zachování vlastností skel, tzn. aby nedocházelo ke krystalizaci. Pro ničení krystalizačních zárodků se zvyšuje teplota nad teplotu liquidu.

Čedičová vlákna jsou téměř amorfní. Občas se mohou vyskytovat malé např. pyroxenové krystaly.

2.2.4. Výroba čedičových vláken

Výrobu čedičových vláken můžeme obecně rozdělit podle principu tvarování do dvou skupin, jsou to [14]:

- tažení nekonečného vlákna z taveniny (skloviny),
- dělení proudu taveniny spojené s tažením krátkých vláken (o délce 1-500 mm).

Vlákna jsou z taveniny tažena mechanickým nebo pneumatickým způsobem jednostupňově (takto se vyrábí vlákno přímo na vanové tavící peci po roztavení vsázky) nebo dvoustupňově u skla (dochází k tvarování vlákna z tavících pícek, do kterých se

dávkuji skleněné kuličky nebo tyčinky) [14]. Tabulka 1 představuje přehled rozdělení technologií čedičových vláken a na nich závislý průměr, délku a podmínky tvarování.

Dále můžeme výrobní způsoby založené na dělení taveniny rozčlenit do tří skupin [14]:

- pneumatické způsoby,
- odstředivé způsoby,
- kombinované způsoby.

Tab. 1 Rozdělení technologií výroby čedičových vláken. Převzato z [14]

Výrobní způsoby	Průměr (μm)	Délka (mm)	Podmínky tvarování T (°C)
mechanické	3 – 30	Nekonečno	1170 - 1300
pneumatické	7 – 18	20 – nekonečno	1200 - 1500
odstředivé: jednokotoučové	15 – 20	50 – 100	1200 - 1300
vícekotoučové	4 – 10	88 - 20	
kombinované	3 – 8	5 – 20	1300 - 1350

2.2.4.1. Pneumatický způsob

Surovinou pro výrobu je drcený (popř. Briketový stav) čedič o velikosti 1 – 3 cm s drceným přídavným materiálem. Následně se zaváže vsázka i s palivem do kupolové pece. Tlakový vzduch nebo přehřátá pára o teplotě 250 až 350 °C slouží jako rozvlákňovací médium. Vlákná se následně tvarují dynamickými silami. Ty se přenášejí z proudícího plynu na praménky taveniny třením. Délka vlákna závisí na jejich tloušťce. Čím menší je průměr, tím kratší jsou vlákna. Nejdůležitější veličiny pro tvarování při této technologii jsou složení taveniny a její vlastnosti, průběh chlazení taveniny, rychlost média a jeho úhel, pod kterým se stýkají plyn s taveninou [14].

2.2.4.2. Odstředivý způsob za použití rozvlákňovacího kotouče

Surovinou je přírodní čedič bez přísad o velikosti drtě 8 – 10 mm, který se zaváže do pece. K tvarování vláken dochází působením odstředivých sil z taveniny

unášené rotujícím tělesem. Střední průměr vláken činí 5-12 μm . Vlákná jsou nestejně dlouhá a mají a proměnlivý průměr [14].

2.2.4.3. Kombinované výrobní způsoby

Kombinované způsoby jsou založeny na působení sil odstředivých a aerodynamických nebo sil mechanických a aerodynamických. Při použití více sil lze snáze a přesněji regulovat základní parametry při tvarování vláken. Tím dojde ke zlepšení jejich jakosti. Pro tavení se používají horniny a korekční přísady, např. vysokopecní strusky, vápence, dolomity apod. Vsázka se spolu s koksem zavází do kupolových pecí. Tavenina se u výroby horninových vláken rozvlákňuje vertikálním odstředivým způsobem. Tvarování vláken se dokončuje proudem vzduchu nebo páry [14].

2.2.5. Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna jsou hladká s plným kruhovým průřezem a sklovitou strukturou. Vlákná, u kterých nastala krystalizace, jsou vysoce křehká a lámavá. Barevný vzhled čedičových vláken je dán použitím surovin při výrobě. Mohou být hnědá, žlutá, hnědozelená, žlutohnědá atd. Délka vláken je dána výrobou. Čedičové vlákno vyrobené odstředivým způsobem za použití rozvlákňovacího kotouče má průměrnou délku 50 – 90 mm, čedičové vlákno vyrobené tažením tryskami o malém průměru a navíjením na kotouč má nekonečnou délku [27].

2.2.5.1. Mechanické vlastnosti

Podle údajů v literatuře [06] jsou mechanické vlastnosti materiálů všeobecně charakterizovány tzv. pracovní křivkou. Čím je křivka strmější, tím větší odpor klade materiál proti deformaci. Základní charakteristiky, které popisují mechanické vlastnosti v oblasti přetruhu, jsou pevnost a tažnost. Čedičová vlákna mají pozitivně zešíkmené

rozložení pevnosti v tahu. Jsou porušována mechanismem křehkého lomu v závislosti na defektech ve vláknech a na povrchu vlákna.

Mezi hlavní vlivy, které ovlivňují pevnost vláken, patří teplota nad 700 °C. Podstatně menší vliv má působení vody a chemický charakter prostředí. Ke změně pevnosti vláken dochází i vlivem času. Vláknem pevnostně stárne. To souvisí s nedokonalostí povrchu, prachovými částicemi a adsorbovanou vlhkostí [06].

Nedokonalostí je v tomto případě myšlena nehomogenita povrchové struktury. Snížení pevnosti je také způsobeno povrchově adsorbovanou vlhkostí. Její destruktivní účinek roste s teplotou [06].

2.2.5.2. Chemické vlastnosti

Chemická odolnost čedičových vláken je dána jejich chemickým složením, technologií výroby, povrchovou úpravou a působením chemikálií. Čedičová vlákna jsou vysoce odolná vůči vlhkosti a vodě (teplé i studené), protože obsahují málo OH-skupin. Dále výborně odolávají luhům (i koncentrovaným). Ve srovnání se skleněnými vlákny jsou však méně odolná vůči kyselinám [10].

Na čedičová vlákna můžeme použít např. již zmíněné testování pevnosti a tažnosti (významné ve srovnání s nezpracovaným vzorkem, kdy se projeví i nepatrné porušení) nebo mikroskopickou zkoušku, kdy se zejména posuzuje narušení vláken [05].

2.2.5.3. Tepelná odolnost a tepelně izolační vlastnosti

Čedičová vlákna se řadí mezi výborné tepelné izolátory. Jsou nehořlavá, silně tlumí pronikající oheň a plameny. Lze je dlouhodobě používat při teplotách do 700 °C. Jejich tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí 0,03 až 0,04 W.m⁻¹K⁻¹ při teplotě 20 °C. Čedičová vlákna mají trojnásobně lepší tepelně izolační vlastnosti než vlákna vyrobená z azbestu. Oproti skleněným vláknům mají čedičová vlákna širší rozpětí operační teploty [27].

2.2.6. Čedičová vlákna a životní prostředí

Oproti obdobným vláknům je výroba a likvidace čedičových vláken k životnímu prostředí velice šetrná a je to velikou výhodou. Přesto se i u nich nachází menší zdravotní riziko při zpracovávání a používání jako jsou např. různé alergické reakce. Čedičová vlákna jsou přírodním materiálem, který se dále zpracovává bez dalších přísad, tím jsou tato vlákna snadněji recyklovatelná, nejsou karcinogenní ani fibrogenní. Tato vlákna se vyrábějí s minimálním průměrem 9 μm a není možné je vdechnout [27].

2.2.7. Použití čedičových vláken

Textilní průmysl

Pro svou nehořlavost, výbornou chemickou a tepelnou odolnost se mohou čedičové materiály použít na výrobu ochranného oblečení.

Z **technicko-ekonomického hlediska** nalézají čedičová vlákna své uplatnění mezi skleněnými a uhlíkovými vlákny. Kompozity z čediče velmi dobře nahrazují všechny známé výztuže. Budovy obsahující kompozity z čedičových vláken, které jsou postaveny blízko silnic, železnic či metra, vstřebají více vibrací než kompozity ze skleněných vláken [09], [11].

Stavebnictví

Vlastnosti čedičových vláken mají důležitý význam ve stavebním inženýrství. K jejich nejvýznamnější vlastnosti patří nízká měrná hmotnost při vysokých hodnotách mechanického namáhání, dále korozní odolnost, výborné dielektrické vlastnosti, nízká tepelná vodivost, vysoká rozměrová stálost a minimální požadavky na dlouhodobou údržbu [26].

Dříve byl čedič využíván převážně pro stavební účely v oblastech jeho přirozeného výskytu (Českolipsko, podhůří Lužických hor, Děčínsko). Nejprve našel stavební uplatnění v podobě šterku pro výstavbu silnic a k výrobě dlažebních kostek. Dále se také z části využíval ve venkovském stavitelství jako zdící materiál na stěny, podezdívky, plotové sloupky nebo opěrné zidky. V současné době se čedič používá ve stavebnictví převážně k výrobě čedičové dlažby. Dále se z čedičových vláken se

vyrábějí perlinkové (armovací) tkaniny. Ty slouží pro vyztužování fasádních zateplovacích systémů a do omítkových systémů. Jako další se z čedičových vláken vyrábí čedičová vlna. Ta je vhodná pro nezatížené zvukové, tepelné a protipožární izolace. [26]

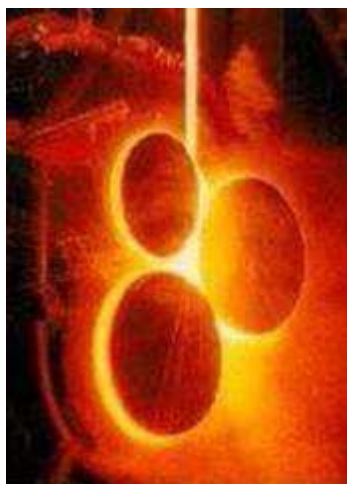
Čedičová vlákna se také využívají k výrobě geotextilií, které slouží převážně v silničním a železničním stavitelství. Další využití těchto vláken je na výrobu tepelně-izolačních směsí pro žáruvzdorné stavební hmoty, jako plniva do tmelů apod. Čedičová vlákna se také používají jako výztužné složky do kompozitů. Novým trendem je využití výrobků z čedičových vláken do vláknobetonů. Zde nahrazují ocel nebo skleněná vlákna. Sklo a ocel nejsou chemicky odolné v alkalickém prostředí, v betonu nejsou chemicky stabilní a dochází k jejich korozi, kdežto čedičová vlákna jsou i v silně alkalickém prostředí chemicky stálá.

Přehled použití čedičových vláken:

- vnější a vnitřní tepelné a zvukové izolace,
- výplň prasklin poškozených budov, mostů a stavebních konstrukcí,
- filtry pro pěstování rostlin v živných roztocích,
- výztuž betonových a asfaltových chodníků a silnic,
- zvukové tlumení silnic,
- potrubí pro ohřev teplé vody,
- telefonní systémy,
- potrubí pro transport chemicky agresivních médií,
- čerpadla pro agresivní kapaliny a plyny,
- nehořlavé tepelné a zvukové izolace pro kabiny, motory aut, plavidel a letadel,
- drenážní potrubí.

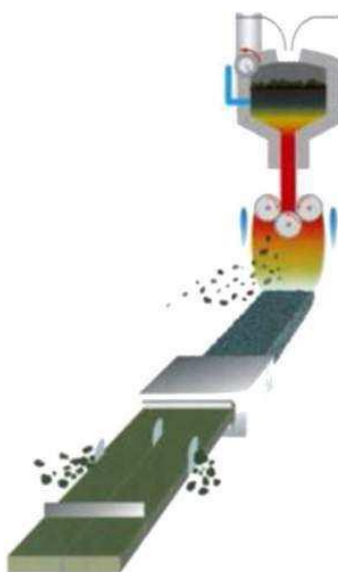
2.2.8. Výroba čedičové vaty

Při výrobě čedičových vláken je prvním krokem tavení vstupního materiálu v kupolové peci na roztavenou lávu. Dále teče roztavená láva na rozvlákňovací stroje a během následného procesu rozvlákňování vzniká jemné vlákno. Toto vlákno je vyrobeno odstředivým způsobem (obrázek 4) [26].



Obr. 4 Odstředivý způsob výroby čedičového vlákna. Převzato z literatury [26]

Na pásu sběrné komory se usazují vlákna v tenkých vrstvách. Takto vzniklá vlna se dále vrství pomocí kyvného systému. Na počtu závisí i vlastnosti, které má mít finální výrobek. Po navrstvení materiálu dojde v krečovacím zařízení ke stlačení na požadovanou tloušťku, případně zde dochází k dorovnání objemové hmotnosti výrobku, a ve tvrdící komoře dojde k vytvrzení materiálu. Nanesená pryskyřice na vláknech se pomocí vysoké teploty roztaví a po následném ochlazení dojde k vytvrzení. Výrobek je dále dopraven k soustavě podélných, příčných a dělicích pil. Zde dochází k formátování výrobku do finálních rozměrů a tvarů (desky, lamely). Posledními fázemi je balení výrobků do fólie, uložení do skladu a následná expedice. Vlastní výroba čedičové vaty je znázorněna na obrázku 5 a výsledný produkt (desky z čedičové vaty) na obrázku 6 [26].



Obr. 5 Znázornění procesu výroby čedičové izolace. Převzato z literatury [26]



Obr. 6 Desky z čedičové vaty. Zdroj [36]

2.3. Kompozitní materiály

2.3.1. Definice kompozitních materiálů

Pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více fází a tyto fáze se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Dále je pro kompozitní materiály charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Tím se liší například od slitin, které jsou rovněž heterogenní [25].

Obvykle je jedna fáze v kompozitu spojitá a druhá nespojitá. Spojitou fází nazýváme matrice a nespojitou označujeme jako výztuž. Matrice zastává funkci pojiva, je to spojitá a obvykle poddajnější složka. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností [25].

Kompozity jsou jednovrstvé nebo mnohovrstvé. Lamino, laminát a hybridní laminát patří mezi mnohovrstvé kompozity. V laminu nalezneme jednu vrstvu vícevrstvého vláknového kompozitu. Dále existuje hybridní laminát. Je také tvořen více vrstvami, ale jednotlivé vrstvy jsou z různých složek [26].

Aby byl vícefázový materiál chápán jako kompozit, musí být splněny následující podmínky [26]:

- mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti výztuže a matrice se liší, výztuž je tužší než matrice a je pevnější v tahu,
- podíl výztuže musí v kompozitu převyšovat 5 %.

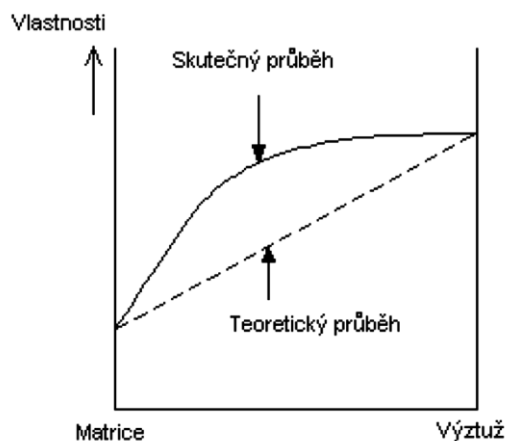
Vlastnosti výsledného kompozitu jsou vyšší, než když se jednotlivé vlastnosti sečtou. Pro kompozitní materiály je tedy charakteristický synergický efekt.

V současném textilním průmyslu jsou například čedičová, kovová, uhlíková, skleněná nebo keramická vlákna využívána jako výztuž. Na našem i světovém trhu se neustále objevují nové druhy kompozitů. Jsou inovovány z kompozitů současných nebo jsou vyvinuty z nových materiálů a struktur. Vývoj kompozitů je velmi významný neboť vede k získávání materiálů se zcela novými vlastnostmi [26].

2.3.2. Synergický efekt

Slovo synergie pochází z řeckého *syn – ergazomai* a v překladu znamená spolupráce, spolupracovat nebo také společné působení [03].

Synergický efekt vznikne při vzájemné spolupráci jednotlivých složek. Alespoň jedna vlastnost kompozitu je vyšší než pouhá sumace vlastností všech složek v kompozitu. Tento efekt lze vysvětlit jako situaci, kdy výsledný celek vlastností je vyšší než pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Tedy platí, že $1+1 \neq 2$, ale součet je větší než 2, viz obrázek 7 [25].



Obr. 7 Znázornění synergického efektu dle literatury [25]

2.3.3. Rozdělení kompozitů

Třídění kompozitů můžeme provést podle těchto hledisek [27]:

- druhu matrice,
- druhu výztuže.

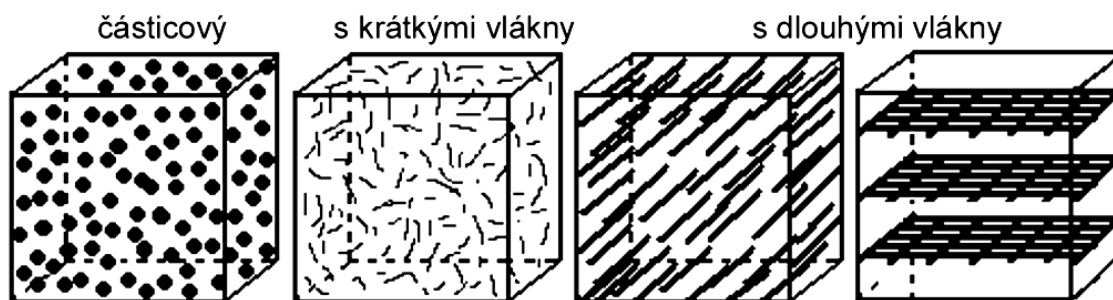
Klasifikace kompozitů podle druhu matrice [29]:

- anorganická matrice (beton, železobeton apod.),
- polymerní matrice (elastomerní, termoplastická apod.),
- keramická matrice (cernety – tj. keramické kompozity vyztužené kovovými vlákny),
- kovová matrice [24].

Klasifikace kompozitů podle druhu výztuže [26], [28]:

- Částicové výztuže (neboli partikulované výztuže). U částicových kompozitů výrazně nepřesahuje jeden rozměr útvarů výztuže ostatní rozměry. Tvar těchto částic může být např. destičkový, kulovitý, tyčinkovitý, ale i nepravidelný. Částice dále mohou být izometrické a anizometrické s náhodnou či preferovanou orientací. Jako příklad částicového kompozitu můžeme uvést beton.
- Vláknové výztuže (fibrilární). Jako výztuž je zde použit materiál, u kterého výrazně převažuje jeden rozměr oproti zbývajícím dvěma rozměrům. Výztuž může být tvořena vlákny. Použita mohou být vlákna krátká nebo dlouhá a orientace těchto vláken je nahodilá či uspořádaná. Jako označení se používá FRC (fiber reinforced composites).
- Kombinované výztuže jsou tvořeny z vláken i částic. Příklady různých druhů vláknových kompozitů jsou znázorněny na obrázku 8.

kompozit



Obr. 8 Druhy vláknových kompozitů – částicový, s krátkými a dlouhými vlákny dle literatury [25]

2.3.3.1. Textilní vlákna pro kompozity

Pro kompozity s textilní výztuží se používají vlákna čedičová, uhlíková, skleněná, keramická, kovová, polymerní, rostlinná, bórová, proteinová atd. Tato vlákna jsou specifická vlastnostmi, mezi které patří vysoká tuhost, pevnost a teplotní stabilita. U těchto vláken bývá nejčastější propojení pomocí polymerní matrice. Např. textilní vlákna jsou užívána do kompozitů pro zesílení. Zvyšují zde tuhost, resp. modul pružnosti, a snižují hmotnost a tepelnou roztažnost výsledných výrobků. Kompozity z textilu jsou zesíleny krátkými nebo kontinuálními vlákny. Kompozity z vláken obsahují vlákna o průměru 1–100 μm . Někdy se mohou používat vlákna o průměru menším než 1 μm . Potom se již tyto kompozity zařazují mezi nanokompozity [09], [26].

2.3.4. Vlastnosti vláknových kompozitů

Kompozity jsou navrhovány s ohledem na aplikaci výrobní technologie, strukturu a konečné použití. Tím se v současné době stávají velice výhodné. Při navrhování kompozitů pro výrobu je nutné brát na zřetel nejen správný výběr materiálů, ale i jejich směšovací poměr. Také se musí brát v úvahu anizotropní vlastnosti kompozitů. Jednotlivé vlastnosti kompozitů se odvíjí v závislosti na složení a poměru jednotlivých složek [26].

Základní vlastnosti vláknových kompozitů [26]:

- Vysoká pevnost – v porovnání s konstrukční ocelí je u kompozitů poměr pevnosti k měrné hmotnosti zhruba dvojnásobný. Proto mohou být kompozity využívány k tvorbě nosných konstrukcí budov, pomocných konstrukcí apod.
- Nízká hmotnost – u vláknových kompozitů je měrná hmotnost v porovnání například s hliníkem cca 1,5 krát nižší. V porovnání s ocelí je cca 4,5 krát nižší. Tato vlastnost umožňuje snížit náklady na manipulaci (nejsou potřeba výkonnější zvedací zařízení apod.) a dále umožňuje sestavení jednotlivých dílčích částí pro konečnou konstrukci mimo a následně je přepravit v celku.
- Odolnost proti korozi – kompozity mají značnou odolnost proti atmosférické korozi. Většina kompozitů také odolává i korozi způsobené chemikáliemi, vodou, bakteriemi, oleji, plísněmi apod. Díky tomu je lze využívat jako ochranné povlaky a nátěry na méně odolné materiály.
- Tepelné a požární vlastnosti – kompozity patří mezi reaktoplasty (termosety) a tím nedojde k jejich tvárnosti při zvýšení teploty. Další významnou vlastností je jejich nízká tepelná vodivost a rozměrová stálost.
- Elektrické vlastnosti - v místech, kde probíhá manipulace s elektrickým zařízením (elektrorozvody apod.), je vhodné využít elektrickou nevodivost kompozitních materiálů. Tuto vlastnost lze úspěšně využít pro výrobu elektrických izolátorů v širokém rozmezí použitelnosti. Další vlastností je elektromagnetická transparentnost kompozitů. To znamená, že elektromagnetické záření prochází kompozitem bez nebo s minimálním tlumením a zkreslením. Využití lze nalézt v blízkosti anténních systémů (kompozitní profily).
- Snadné opracování – kompozity lze opracovat (brousit, řezat, soustružit apod.) běžnými nástroji, které se používají na opracování kovů.
- Snížení nákladů na údržbu – oproti jiným materiálům jsou kompozity odolné proti UV záření, korozi apod. Díky tomu nevyžadují téměř žádnou údržbu v jakémkoliv prostředí.

2.3.5. Použití kompozitů

Způsob zpracování kompozitů se výrazně liší oproti tradičním materiálům. Ve většině případů probíhá výroba kompozitů v jednom kroku s konečným produktem a tento fakt může způsobovat komplikace při konstruování nových výrobků. U tradičních konstrukčních materiálů lze snadno oddělit vlastnosti materiálu od užitečných vlastností konečného výrobku. Toto je však u kompozitů velice obtížné [26].

Kompozity jsou pro své vlastnosti používány v mnoha oblastech. Lze uvést například [26]:

- v automobilovém průmyslu (části karosérií, skříň sedadel, kryty světel apod.),
- v letectví (přistávací kola a trupy letadel, křídla, vrtule helikoptér apod.),
- v lodním průmyslu (na stožáry, paluby, trupy apod.),
- ve stavebnictví (pro zesílení betonových, ocelových, zděných, dřevěných a dalších konstrukčních prvků),
- v chemickém průmyslu (pro nádrže, cisterny, tlakové nádoby, apod..),
- v elektrotechnice (rozvaděče, izolátory, spínače apod.),
- v nábytku a zařízení (stoly, židle, skříň, linky apod.),
- ve sportovním vybavení (lyže, tenisové rakety, rybářské pruty, plavecké bazény, kanoe apod.),

3. Experimentální část

3.1. Návrh experimentu

Jak již bylo v této bakalářské práci zmíněno, některá syntetická a technická vlákna se v současnosti přidávají do betonů jako výztuž v různých formách, přičemž se snažíme využít menší ekologické zátěže geopolymérů oproti betonu. Z tohoto důvodu je experiment zaměřen na využití krátkých odpadů čedičových vláken v geopolymerech.

Experiment byl proveden na zkušební směsi geopolyméru H160, tj. Bausic L160 aktivovaný aktivátorem H160.

Během experimentu byly vyrobeny vždy dva vzorky záměsí s hmotnostním přírůstkem krátkých odpadových čedičových vláken v různých množstvích. U těchto vzorků byla následně odzkoušena pevnost v ohybu za pomoci zkušebního tělesa.

3.2. Bausic L160

Bausic pojivo vyráběné ve firmě České lupkové závody, a. s. se chová při normálních podmínkách jako Portlandský cement, vyniká vysoce rychlým tvrdnutím. 40 - 50 % konečné pevnosti je dosaženo za 1 den a 90% pevnosti během 7-14 dnů tvrdnutí při pokojové teplotě. Pojivo Bausic neobsahuje hydratační vodu a nemůže v ohni explodovat, je využitelný ve spojení s žáruvzdornými plnivými jako lupek, může být vystaveno teplotám až do 1200°C. Bausic pojiva jsou vyráběna jako série s různou počáteční (80-160 minut) a konečnou dobou tuhnutí (2-4 hodiny), které tvoří produkty s fixními mechanickými vlastnostmi [20]. Základní technické údaje udávané výrobcem jsou vypsány v tabulce 2.

Tab. 2 Technické údaje pojiva Bausic L160

Geopolymerní pojivo Bausic L160	
Počáteční doba tuhnutí	(20°C) 160 min
Konečná doba tuhnutí	(20°C) 230 min
Pevnost v tlaku	> 90 MPa za 28 dní
Pevnost v ohybu	12 - 14 MPa za 28 dní

3.3. Technologický postup

U pojiva Baucis L160 je nutné přesně dodržovat technologický způsob jeho zpracování a dodržovat bezpečnost při práci. Při manipulaci s Baucis aktivátorem a čerstvou směsí by měl laboratorní pracovník používat pracovní oděv a rukavice. Samozřejmostí je i respektování bezpečnostních pravidel aplikovaných v jeho laboratoři. Během zpracování mu může asistovat druhý pracovník, jenž se stará o okamžité čištění náradí vodou před ztvrdnutím pojiva [30].

3.3.1. Všeobecné pokyny

U pojiva Baucis L160 je počáteční doba tuhnutí méně než 160 minut (začínající od mixování pojiva). Následuje doba tuhnutí 70 minut. Celkem je tedy doba od počátku mixování až po konečné vytvrdnutí pojiva 230 minut při pokojové teplotě (20 °C). Doba a rychlost tuhnutí závisí na okolní teplotě. Počáteční doba tuhnutí u pojiva Baucis L160 je měřena při teplotě 20 °C. Pokud je teplota v laboratoři vyšší, bude doba tuhnutí kratší. Například v letním období, za předpokladu, že není použita v laboratoři klimatizace, při 25 °C je začátek tuhnutí u BAUCIS L160 130 minut. V letním období je doporučeno připravovat směs brzy ráno nebo po krátkém uskladnění všech komponent v chladícím zařízení [30].

3.3.2. Pokyny pro použití pojiva Baucis na jednotlivé aplikace:

Postup zpracování [30]:

1. Připraví se 5 váhových dílů cementu, 4 váhové díly aktivátoru a kolem 50% až 200% plniva v závislosti na zrnitosti. Obecné množství plniva u frakce:
 - 0 - 0,2 mm je 50 - 75%,
 - 0 - 0,5 mm 75 - 125%,
 - 0 - 1mm 125 - 150%,
 - 0 - 2 mm 150 - 200%.
2. Aktivátor se nalije do cementu.

3. Dávka se míchá, dokud nezíská formu tekuté pasty. Doba zpracování se liší podle použitého zařízení. Přibližná doba zpracování při použití mixéru je cca 2 minuty. Poté se pokračuje ve zpracování dalších cca 5 až 8 minut.
4. Průběžně se přidává plnivo do pasty a míchá se dalších 5 minut. Pokud bylo prováděno míchání pasty ručně, je doporučeno využít vibrací a to hlavně po samotném míchání cementu s aktivátorem a po smíchání pasty s plnivem.
5. Směs se vlévá do formy na vibračním stole za provozu postupně od středu formy k okrajům. V případě použití kovových forem je nutné na formu nejprve aplikovat oddělovače. To mohou být různé druhy organických olejů jako například slunečnicový, kokosový nebo řepkový. Po odlití směsi se forma uzavře polymerovou vrstvou, která zabrání odpaření vody.
6. Výsledná směs se nechá přes noc ztuhnout. Pokud je nutné vyndání vzorků z formy, lze tak učinit nejdříve po 6 až 7 hodinách.
7. Zařízení může být lehce očištěno vodou před tím, než směs úplně ztuhně.
8. Jakmile směs ztuhně, vzorky se dají do plastového sáčku a hermeticky uzavřou. Takto se skladují nejméně 5 dnů při pokojové teplotě.
9. Než vzorky úplně ztuhnou, lze provést povrchovou úpravu. Vzorky mají během prvního dne černo-zelené zabarvení. Je to známkou probíhající řádné chemické reakce.
10. Po 5 dnech se vzorky vyjmou z plastového sáčku. Barva na povrchu by se již měla vrátit do původní podoby. V závislosti na rozměru vzorku se barva mění i uvnitř postupně během dalších 5 až 21 dnů sušením na vzduchu. Tato skutečnost je viditelná na lomu vzorku.

Velice důležité je dodržovat následující pravidla během přípravy produktů z pojiva Baucis:

- Použití plniva je **povinné**, jinak pojivo Baucis praskne. Stane se to především po nasáknutí vody. Tyto charakteristiky upozorujete na horní části vzorků, kde se plnivo mohlo přelít.
- Je nutné zabránit vypařování vody alespoň prvních 24 hodin, jinak dojde k viditelnému smrštění vzorků (až o 2% své délky). Vzorek se prvních 24 hodin nesmí ani ohýbat. Při ohybu dojde k následovnému vzniku prasklin na povrchu.

- Po několika týdnech mohou vzorky produkovat výkvěty bikarbonátu sodného (hlavně po namočení vodou a jejím následném odpařování). To může způsobovat problémy pro některé aplikace.

3.4. Poměry jednotlivých směsí

Byly zhotoveny čtyři druhy vzorků s procentuální hmotností 30, 40, 50 a 60 % krátkých odpadových čedičových vláken. Celková hmotnost jednoho vzorku činila 180 g.

Na obrázku 9 je fotografie Baucisu L160 v sypké podobě a odpadová čedičová vata je zobrazena na obrázku 10.

Pro každý poměr byly zhotoveny 2 kusy bez povrchově aktivních látek a 2 kusy s přidavkem povrchově aktivních látek. Hmotnost jednotlivých složek testovaných směsí jsou vypsány v tabulce 3.

Tab. 3 Hmotnost jednotlivých složek

Poměr směsi čedičových vláken [%]	Baucis L160 [g]	aktivátor H160 [g]	krátká čedičová vlákna [g]
30	70	56	54
40	60	48	72
50	50	40	90
60	40	32	108



Obr. 9 Baucis L160 v sypké formě



Obr. 10 Odpadová čedičová vata

3.5. Postup přípravy vzorků

Vzorky byly připravovány podle pokynů pro zpracování vzorků zmíněných výše. Postup přípravy všech směsí je shodný a liší se pouze v hmotnostním poměru jednotlivých složek. Z tohoto důvodu bude v předložené bakalářské práci popsán pouze postup výroby pro jednu směs. Konkrétně pro směs s 30% čedičových vláken bylo postupováno takto:

Směs byla připravována při okolní teplotě 25 °C, relativní vlhkosti 45% a atmosférickém tlaku 97,24 kPa. Na laboratorní váze OHAUS[®] E4000D (obrázek 11) byly naváženy jednotlivé složky. Bylo naváženo 70 g Baucisu L160, 56 g aktivátoru H160 a 54 g odpadových čedičových vláken (vaty). Následně byla odpadová vata z čedičových vláken rozmělněna a rozdrcena v hmoždíři (obrázek 12) na délku vláken cca 0,5 až 2 mm.

Před samotným mísením směsi byl na kovovou lištu (obrázek 13) o vnitřní šířce 27 mm, výšce 20 mm a délce 1000 mm aplikován organický olej (slunečnicový).

V plastové nádobě byl smísen Baucis L160 a aktivátor H160 v poměru 5 hmotnostních dílů Baucisu a 4 hmotnostní díly aktivátoru. Směs byla dále ručně míchána dřevěnou špachtlí po dobu přibližně 3 minut, dokud směs nezískala formu tekuté pasty. Následně byla směs míchána dalších 5 až 9 minut. Po tomto zpracování směsi byla přidána rozdrcená čedičová vlákna a posléze byla směs míchána dalších 5 minut.

Takto připravená směs byla vlita do formy od středu ke krajům, zároveň bylo prováděno ruční stříhání a přechování. Po vyplnění formy byla směs i s formou překryta plastovou fólií, která zabraňovala odpařování vody.

Vzorek byl ponechán zakrytý ve formě do příštího dne. Po vyndání z formy byl hermeticky uzavřen v plastovém sáčku a takto skladován 5-7 dnů. Nakonec byl vzorek vyjmut z plastového sáčku a ponechán dalších cca 30 dnů volně v laboratoři při pokojové teplotě 22 až 26 °C.

Fotografii vyrobených vzorků naleznete na obrázku 14.



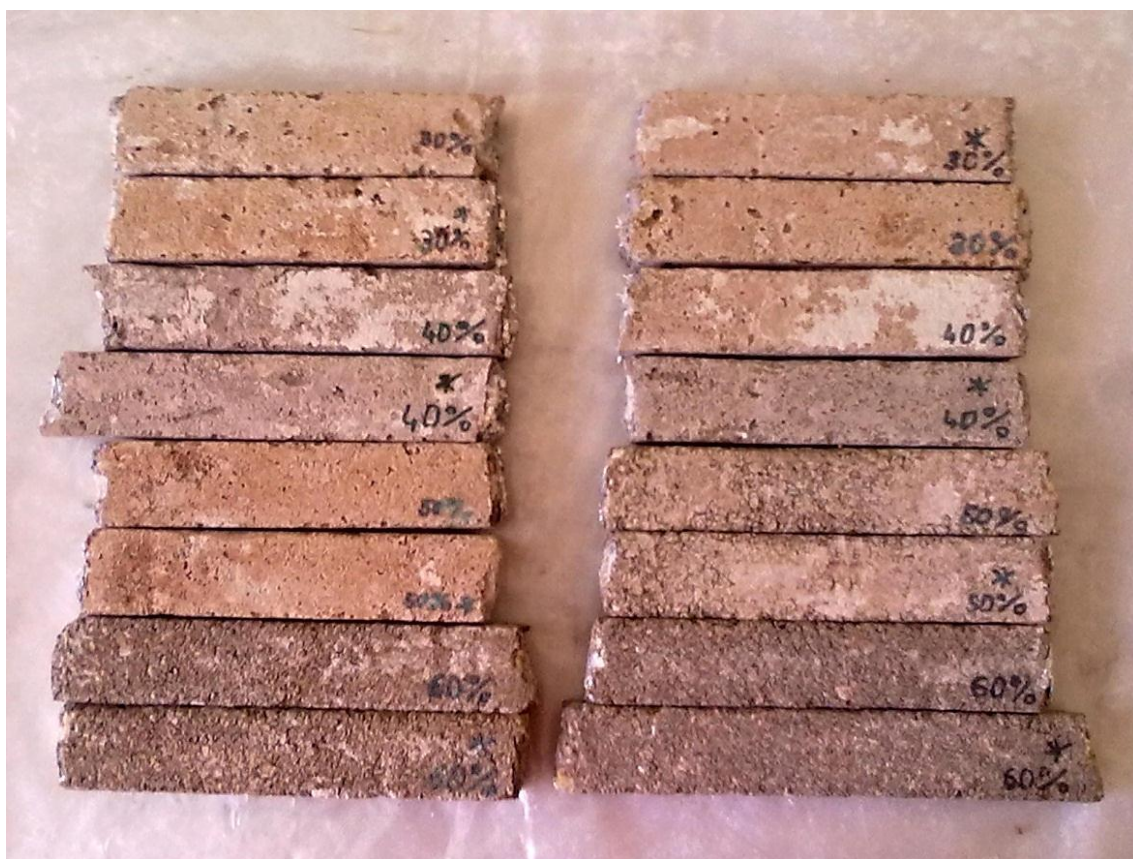
Obr. 11 Laboratorní váha OHAUS® E4000D



Obr. 12 Hmoždírka použitá k drcení odpadové čedičové vaty



Obr. 13 Kovová lišta použitá jako forma



Obr. 14 Vzorky směsí

3.6. Zkoušení vzorků

Před samotnou zkouškou byly zjištěny rozměry a hmotnosti jednotlivých vzorků. Z těchto hodnot byla dopočítána měrná hmotnost a její přehled lze nalézt v tabulce 4.

Tab. 4 Měrná hmotnost zkoušených vzorků

Směs	Měrná hmotnost [kg . m-3]			
	Bez PAL		S PAL	
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
30 %	1761,59	1734,29	1929,04	1894,67
40 %	1856,98	1910,22	1914,13	1941,31
50 %	1918,52	2032,76	1980,84	1942,66
60 %	1959,39	1999,62	1921,48	1930,16

Zkoušení vzorků na pevnost v ohybu probíhalo na zkušebním zařízení TIRA test 2003 (obrázek 15). Tento přístroj umožňuje potřebné nastavení rozteče mezi podpěrami dolní čelisti (obrázek 16). Vzdálenost mezi nimi byla volena 50 mm. Průměr přítlačného válečku na horní čelisti byl 15 mm.

Před samotným zkoušením byly vzorky aklimatizovány na zkušební podmínky v laboratoři. Podmínky měření: Okolní teplota vzduchu byla $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, relativní vlhkost $\phi = 42\%$ a atmosférický tlak byl $p = 96,79\text{ kPa}$. Dále byly do přístroje nastaveny parametry zkoušky. Tj. příčný průřez zkoušeného vzorku 27x20mm, ukončení zkoušky bylo nastaveno na hodnotu protažení 5 mm, rychlost zatěžování 0,2 mm za sekundu a na zkoušený vzorek nebylo aplikováno předpětí.

Vzorek byl umístěn do čelistí na spodní podpěry zkušebního stroje, horní přítlačný váleček byl přesunut až na zkoušený vzorek. Umístění musí být provedeno tak, aby síla působila kolmo na zkušební těleso. Zatěžování musí probíhat plynule, bez nárazu. Na přístroji byla vynulovaná hmotnost, vzdálenost a měřená síla na čelistech. Následně byla spuštěna zkouška a naměřené hodnoty převedeny do elektronické podoby. Po zkoušce následuje výpočet pevnosti v ohybu. Výpočet je podle literatury [33] a [34] dán vztahem (1):

$$\sigma_w = \frac{3 * F_{\max} * L}{2 * b * h^2} \quad (1)$$

kde: σ_w – pevnost v ohybu [MPa]

F_{\max} – maximální dosažená síla v ohybu [N]

L – vzdálenost mezi podpěrami zkušebního stroje [mm]

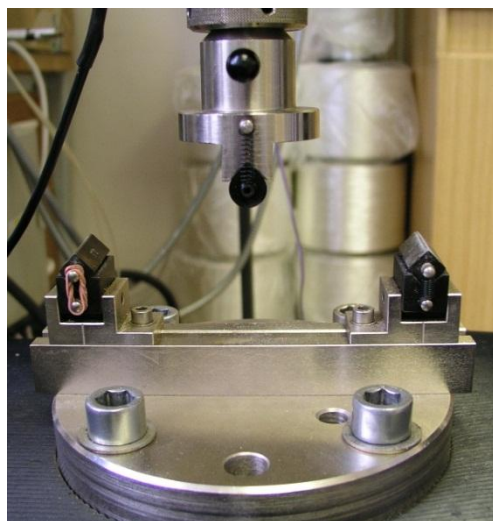
b – šířka příčného řezu tělesa [mm]

h – výška příčného řezu tělesa [mm] [35]

Výsledná pevnost v ohybu se podle normy [33] zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa. Vyhodnocení zkoušek jednotlivých vzorků je uvedeno v tabulkách 5 až 12. Průměrné výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 13.



Obr. 15 Zkušební přístroj TIRA test 2003



Obr. 16 Čelisti zkušebního přístroje TIRA test 2003

3.7. Obrázky lomu vzorků

Na obrázcích 17 až 20 je v lomu vidět struktura testovaných vzorků. Lze si všimnout i větších heterogenních čedičových oblastí. S rostoucím poměrem čedičových vláken je lom méně hladký. Na lomu vzorku s 60 % čedičových vláken jsou již velice patrné různé výšky materiálu od roviny lomu. Tento efekt je výsledkem menší soudržnosti vzorků s vyšším poměrem čedičových vláken.

Vzorky s 50 a 60 % čedičových vláken převažovala již při výrobě spíše sypká podoba a oproti vzorkům s 30 a 40 % čedičových vláken nebyly tekuté (kašovitě).



Obr. 17 Vzorek s 30% čedičových vláken



Obr. 18 Vzorek s 40% čedičových vláken



Obr. 19 Vzorek s 50% čedičových vláken



Obr. 20 Vzorek s 60% čedičových vláken

3.8. Vyhodnocení zkoušky

V tabulkách 5 až 12 je uvedeno vyhodnocení měření a v tabulce 13 se nacházejí průměrné hodnoty z jednotlivých měření vzorků a podle vztahu (1) pro ně byla spočítána pevnost v ohybu. Poté následuje graf pro lepší zhodnocení výsledků (obrázek 21).

Následující tabulky obsahují různá označení veličin, kde:

A_{\max} – maximální průhyb [mm] a [%]

F_{\max} – maximální dosažená síla v ohybu [N]

E – modul pružnosti [MPa]

σ_w – pevnost v ohybu [MPa]

Pro velkou nepřesnost výpočtů intervalu spolehlivosti (dolní hranice L_d vycházejí v záporných hodnotách) nebyl interval spolehlivosti vyjádřen. Totéž platí pro variační koeficient.

Byl proveden i experiment porovnání pevnosti samotného Baucisu s výsledkem, že samotný Baucis a vzorky do 20% směsi se při vyjímání z formy rozpadaly. Přestože výrobce uvádí pevnost samotného Baucisu 12 až 14 MPa, nebylo možno tuto pevnost ověřit.

Tab. 5 Výsledek zkoušky směsi s 30 % čedičových vláken

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	0,37109	7,42	1109,17	29,4	7,7
2	0,29996	6,00	1063,99	37,4	7,4
Průměr	0,33553	6,71	1086,58	33,4	7,5

Tab. 6 Výsledek zkoušky směsi s 40 % čedičových vláken

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	0,83422	16,68	1108,30	23,3	7,7
2	0,33701	6,74	1171,27	41,5	8,1
Průměr	0,58562	11,71	1139,79	32,4	7,9

Tab. 7 Výsledek zkoušky směsi s 50 % čedičových vláken

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	1,31928	26,39	726,25	22,5	5,0
2	1,46585	29,32	986,86	29,2	6,9
Průměr	1,39257	27,86	856,55	25,8	5,9

Tab. 8 Výsledek zkoušky směsi s 60 % čedičových vláken

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	0,52151	10,43	454,47	13,6	3,2
2	0,40903	8,18	414,01	11,4	2,9
Průměr	0,46527	9,31	434,24	12,5	3,0

Tab. 9 Výsledek zkoušky směsi s 30 % čedičových vláken a přídavkem PAL

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	0,84637	16,93	923,97	32,0	6,4
2	1,07993	21,60	1040,93	29,3	7,2
Průměr	0,96315	19,27	982,45	30,6	6,8

Tab. 10 Výsledek zkoušky směsi s 40 % čedičových vláken a přídavkem PAL

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	0,41051	8,21	1129,48	40,6	7,8
2	0,41481	8,30	1049,04	41,5	7,3
Průměr	0,41266	8,26	1089,26	41,0	7,6

Tab. 11 Výsledek zkoušky směsi s 50 % čedičových vláken a přídavkem PAL

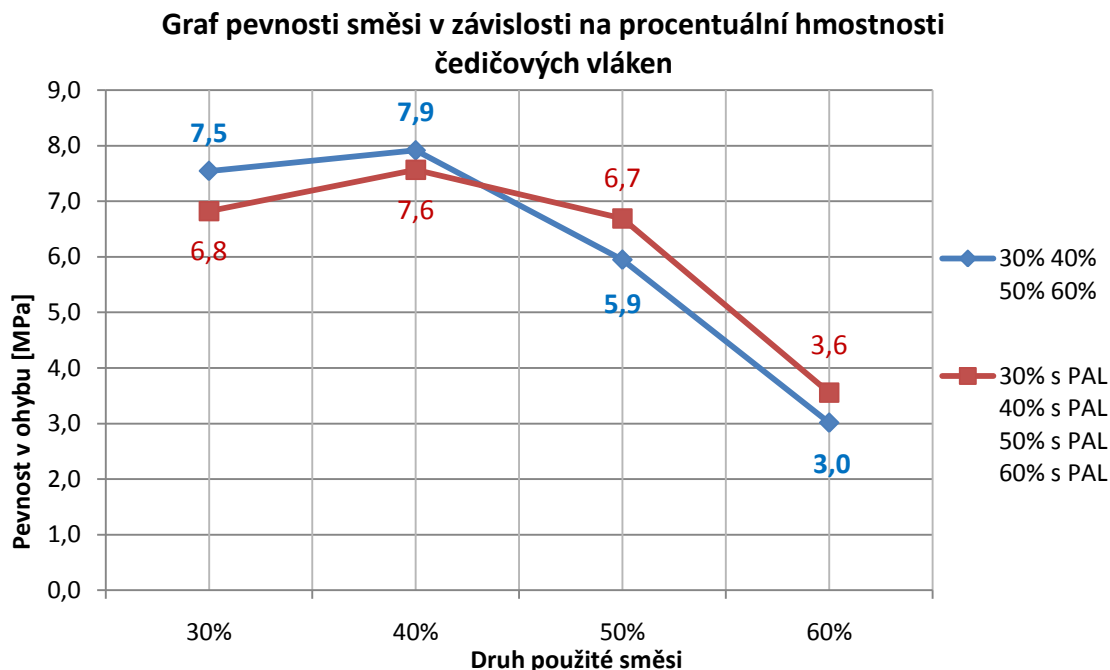
Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	1,54306	30,86	1142,70	43003,2	7,9
2	1,80330	36,07	784,65	21122,1	5,4
Průměr	1,67318	33,47	963,68	32062,6	6,7

Tab. 12 Výsledek zkoušky směsi s 60 % čedičových vláken a přídavkem PAL

Číslo vzorku	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
1	2,07421	41,48	412,67	11,4	2,9
2	1,68488	33,70	611,33	14,2	4,2
Průměr	1,87955	37,59	512,00	12,8	3,6

Tab. 13 Porovnání průměrných hodnot měření

Vzorek	A_{\max} [mm]	A_{\max} [%]	F_{\max} [N]	E [MPa]	σ_w [MPa]
30%	0,33553	6,71	1086,58	33,44	7,5
40%	0,58561	11,71	1139,79	32,41	7,9
50%	1,39257	27,86	856,55	25,82	5,9
60%	0,46527	9,31	434,24	12,52	3,0
30% s PAL	0,96315	6,71	982,45	33,44	6,8
40% s PAL	0,41266	8,26	1089,26	41,01	7,6
50% s PAL	1,67318	33,46	963,68	32,06	6,7
60% s PAL	1,87954	37,59	512,00	12,77	3,6



Obr. 21 Graf pevnosti směsi v závislosti na procentuální hmotnosti čedičových vláken

Z grafu na obrázku 21 vyplývá, že ze zkoušených vzorků o hmotnostních poměrech 30, 40, 50 a 60 % se jako nejvhodnější pro využití jeví směsi s poměrem 40 % krátkých odpadových čedičových vláken. Směsi s 30 % odpadových čedičových vláken dosahují nižších hodnot napětí, než směsi s 40%. Výrazně horších hodnot napětí však dosáhly směsi s 50 a 60 % odpadových čedičových vláken, proto jsou pro využití nevhodné.

Dále z grafu vyplývá, že přidavek povrchově aktivní látky nevede ke zlepšení výsledných mechanických vlastností. Rozdíly mezi dosaženými pevnostmi u směsí s povrchově aktivními látkami a u směsí bez povrchově aktivních látek jsou minimální a trend průběhu závislosti je zachován.

4. Závěry a doporučení

Cílem této bakalářské práce bylo najít uplatnění odpadového materiálu z výroby čedičových izolací. Jedním ze způsobů uplatnění je použití čedičového odpadu jako plnivo do geopolymerů, které by se mohly uplatnit u sanačních konstrukcí, soch atd. Experiment byl navržen tak, že se krátká odpadová čedičová vlákna zakomponují do geopolymeru v různých hmotnostních poměrech bez přídavku povrchově aktivních látek a s jejich přídavkem. U takto vzniklých kompozitních směsí byla provedena zkouška pevnosti v ohybu. Ze zkoušených vzorků o hmotnostních poměrech 30, 40, 50 a 60 % se jako nejvhodnější pro použití jeví směs s poměrem 40 % čedičových vláken. Směs s 30 % odpadových čedičových vláken dosahuje nižších hodnot napětí, než směs s 40%. Výrazně horších hodnot napětí však dosahují směs s 50 a 60 % odpadových čedičových vláken, které vykazují menší mechanickou odolnost a zpracovatelnost a proto jsou pro využití nevhodné.

Podle získaných výsledků můžeme říci, že přídavek povrchově aktivní látky nevedl k výraznému zlepšení výsledných mechanických vlastností. Oproti směsím bez povrchově aktivních látek došlo u těchto směsí ke zmenšení rozdílu mezních mechanických hodnot.

Ze zjištěných výsledků plyne doporučení dalšího vývoje a posléze i výroby pro směs geopolymeru s 40 % přídavkem krátkých odpadových čedičových vláken bez PAL. Oproti ostatním směsím byla zjištěna nejlepší pevnost v ohybu a díky své konzistenci byla čerstvá směs i dobře zpracovatelná.

Problematika je natolik obsáhlá a zajímavá, že je možno doporučit další pokračování práce na tomto vývoji.

5. Seznam použité literatury

- [01] MILITKÝ, J. : *Textilní vlákna : klasická a speciální*. (učební text) Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2002. 238 s.
- [02] Amethyst Galleries. *Basalt* [online]. [cit. 12. 11. 2010]. Dostupný z: <<http://www.galleries.com/rocks/basalt.htm>>.
- [03] ODETKA.CZ. *Specifikace materiálu: Basalt* [online]. 2010 [cit. 5. 10. 2010]. Dostupný z: <http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_basalt.aspx>.
- [04] TOMKOVÁ, B. : *Textilní kompozity*. Studijní materiály Technické univerzity v Liberci, Fakulty textilní [online]. 2010 [cit. 31. 10. 2010]. Dostupné z <<https://skripta.ft.tul.cz>>.
- [05] MILITKÝ, J.; ZEISBERGEROVÁ, J.; KOVAČIČ, V. : *Chemical degradation of basalt fibers*. [online]. 2010 [cit 05. 09. 2010]. Dostupný z: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.2_publikace/%5B3.2.13%5D.pdf>.
- [06] DANIEL, P.; GRÝCOVÁ, A.; ČECH, V. : *Základní charakteristiky čedičových vláken*. Brno : Vysoké učení technické v Brně. 5 s.
- [07] PARNAS, R.; SHAW, M.; LIU, Q. : *Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites* [online]. The New England Transportation Consortium: 2007 [cit 04.09.2010]. Dostupný z: <<http://www.netc.umassd.edu/finalreport63.pdf>>.
- [08] STUDENTKA.CZ *Nerosty a horniny*. [online]. 2010 [cit 06. 09. 2010]. Dostupný z: <<http://studentka.sms.cz>>.
- [09] BASALTFM. *Basalt fiber & composite materials technology development*. [online]. 2010 [cit 03. 09. 2010]. Dostupný z: <<http://basaltfm.com/eng/fiber/info.html>>.
- [10] WIENER, J.; PRŮŠOVÁ, M.; KRYŠTŮFEK, J. : *Chemicko-textilní rozbor*. 122 s.
- [11] KOVAČIČ, V.; JAMBOŘOVÁ, J.; KULÍŠKOVÁ, G.; GRÉGR, J.; ŠILCOVÁ, M.: *Odezva kompozitů s čedičovou výztuží a polysiloxanovou maticí na termomechanická a dynamická namáhání* [online]. 2010 [cit 05. 09. 2010]. Dostupný z: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.2_publikace/%5B3.2.16%5D.pdf>.

- [12] BILČÁK, M. : Bakalářská práce. TU v Liberci, 2008.
- [13] MACKOVÁ, L. : Diplomová práce, TU v Liberci, 2000.
- [14] MACH, M. : Diplomová práce, TU v Liberci, 2003.
- [15] INSTITUT GEOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ, Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská. *Tavené horniny* [online]. 2010 [cit. 09. 11. 2010]. Dostupný z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html>.
- [16] JIRÁSEK, J.: *Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů* : bakalářská práce. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. 73 s.
- [17] VAN JAARVELD, J.G.S. - VAN DEVENTER, J.S.J. - LORENZEN, L. : *The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. 1997, Minerals Engineering, 7 (1997), s. 659 - 669. ISSN 0892-6875.*
- [18] VAN JAARVELD, J.G.S. - VAN DEVENTER, J.S.J. - LORENZEN, L. *The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics. 1999, Materials Engineering, 1 (1999), s. 75 - 91. ISSN 0892-6875.*
- [19] BILČÁK, M. : *Využití geopolymerních materiálů pro sanační technologie.* 2007, Ročníkový projekt. Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Technická univerzita v Liberci.
- [20] ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY. *Geopolymery* [online]. 2010 [cit. 09. 11. 2010]. Dostupný z: <<http://www.cluz.cz/?page=cz,geopolymery>>.
- [21] CLAY Polymers. *Geopolymers* [online]. 2010 [cit. 10. 11. 2010]. <<http://www.geopolymers.eu>>.
- [22] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Koroze skla* [online]. 2010 [cit. 19. 11. 2010]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/sil/chemtech/vyzkum/koroze/koroze_skla-odpady.htm>.
- [23] PERNÁ, I. : *Syntéza a vlastnosti geopolymerních hydratovaných anorganických materiálů.* 2005, Disertační práce. Ústav skla a keramiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Školitel František Škvára.
- [24] GEOPOLYMER INSTITUTE. *Geopolymers* [online] 2010, [cit. 15. 11. 2010]. Dostupný z: <<http://www.geopolymer.org>>.
- [25] MICHNA, Š. *Kompozitní materiály* [online] 2010, [cit. 11. 12. 2010] Dostupný z: <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf>.

- [26] REJMANOVÁ, L. : Diplomová práce, TU v Liberci, 2010.
- [27] ŠTĚPÁNKOVÁ, J. : *Využití pevnosti čedičových vláken ve svazku*. Liberec: Diplomová práce, 2008. 48 s.
- [28] PTICEN, F.: *Stavebnictví a interiér, Článek o metakaolinu* [online]. 2007 [cit 11. 09. 2010] <<http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/metakaolin>>.
- [29] SKRIPTA.FT.TUL.CZ *Textilní kompozity* [online]. 2009 [cit. 20. 11. 2010]
Dostupný z: <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/list_aut.cgi?aut=32&skr=44&pro=>.
- [30] ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, a.s. : *Manual L160-cz*, manuál pro zpracování pojiva Baucis L160. 2010. 2 s.
- [31] ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, a.s. : *ML Baucis L160-cz*, technické údaje o pojivu Baucis L160. 2010. 1 s.
- [32] MILITKÝ, J.; KOVAČIČ, V. : *Endlose basaltfasern – struktur, eigenschaften und anwendung*, Dresden, 2006, 30 s.
- [33] ČSN EN 12390 – 5 (731302): *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*.
- [34] ČVUT v Praze, Centrum experimentální geotechniky. *Pevnost v tahu za ohybu* [online] 2010 [cit. 11. 12. 2010] Dostupný z:
<<http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/zkousky/pevnosti-vlastnosti/pevnost-v-tahu-za-ohybu>>.
- [35] FAKULTA LESNICKÁ A ENVIRONMENTÁLNÍ. *Pevnost v ohybu* [online]. 2010 [cit. 18. 12. 2010]. Dostupný z:
<http://wwwold.fle.czu.cz/~web/studium/FLD/prijimaci_rizeni/Studijni_materialy_pro_DI/Nauka_o_dreve/12_pevnost_v_ohybu.pdf>.
- [36] ONE SUN GLOBAL. Basalt wool [online]. 2010 [cit. 22. 11. 2010]. Dostupný z:
<<http://onesun-global.com/index.php/product/High%20density%20board.html>>